

УДК 523.3

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ОТНОШЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ЦВЕТА ДВУХ УЧАСТКОВ ВИДИМОГО ПОЛУШАРИЯ ЛУНЫ

© 2010 г. В. Г. Кайдаш¹, С. Ю. Герасименко¹, Ю. Г. Шкуратов¹,
Н. В. Опанасенко¹, Ю. И. Великодский¹, В. В. Корохин¹, М. В. Кайдаш²

¹НИИ астрономии Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина,

Харьков, Украина

²Харьковский национальный экономический университет,

Харьков, Украина

Поступила в редакцию 16.06.2009 г.

По данным наземной колориметрии для двух участков поверхности видимого полушария Луны построены изображения фазового отношения показателя цвета $C(600\text{ нм}/470\text{ нм})$ для углов фазы, лежащих в интервале от 2° до 95° . Найдено, что этот показатель цвета для материковых регионов растет с фазовым углом быстрее по сравнению с морскими районами вплоть до углов фаз $\alpha \sim 40^\circ\text{--}50^\circ$. В диапазоне больших фазовых углов $\alpha > 50^\circ$ наблюдается обратная ситуация. Данные лабораторной спектрофотометрии образцов лунного грунта подтверждают найденные особенности фазовой зависимости цвета. Обсуждается влияние многократного рассеяния на фазовую зависимость показателя цвета морских и материковых регионов Луны.

PACS: 95.75.De, 96.20.-n

ВВЕДЕНИЕ

В оптических исследованиях безатмосферных небесных тел традиционной задачей является изучение зависимости яркости их поверхности от фазового угла в различных спектральных диапазонах. Такие данные, в частности, позволяют строить фазовую зависимость показателя цвета (колор-индекса) $C(\alpha) = R(\lambda_1, \alpha)/R(\lambda_2, \alpha)$, где R — яркость для различных длин волн λ_1, λ_2 при некотором фазовом угле α . При использовании спектрофотометрических данных для прогнозирования химико-минералогического состава твердых поверхностей небесных тел обычно вариациями фазового хода $C(\alpha)$ пренебрегают. Однако это возможно только в первом приближении. Для повышения надежности дистанционного оптического зондирования зависимость $C(\alpha)$ необходимо изучать и учитывать в обработке и интерпретации данных. Следует также отметить, что вариации зависимости $C(\alpha)$ несут информацию о структурных свойствах верхнего слоя планетных реголитов и потому их исследование представляет самостоятельный интерес.

Изучение фазового хода показателя цвета Луны наземными и космическими средствами

Луна — самый наблюдаемый астрономический объект. Однако долгое время фазовую зависимость показателя цвета ее поверхности обнаружить не удавалось (Соупе, 1965). Американская

программа Apollo и советские лунные миссии в конце 1960-х начале 1970-х гг. вызвали интерес к изучению Луны наземными оптическими средствами. Различными авторами в то время были проведены спектрофотометрические наблюдения ее поверхности в видимом и ближнем ИК-диапазонах спектра. В работах тех лет (Peacock, 1968; McCord, 1969; Mikhail, 1970; Евсюков, 1975) фазовая зависимость показателя цвета поверхности Луны была установлена более или менее надежно. В частности, было показано, что лунная поверхность “краснеет” от полнолуния к четвертям, т.е. показатель цвета $C(\alpha) = R(\lambda_1, \alpha)/R(\lambda_2, \alpha)$ (здесь и далее будем считать, что $\lambda_1 > \lambda_2$) растет с углом фазы, и эти изменения, в среднем, составляют около 10% (McCord, 1969). Тогда же отмечалось, что при достаточно больших углах фазы показатель цвета начинает уменьшаться, т.е. возможен максимум зависимости $C(\alpha)$ при $\alpha \approx 40^\circ$ (Евсюков, 1975). Впрочем, точность измерительной техники была тогда невысока, и требовались новые наблюдения с целью уточнения поведения лунных спектров с изменением угла фазы. Позднее, в начале 1990-х годов, появились сообщения о том, что зависимость $C(\alpha)$ для некоторых лунных деталей показывает на пределе точности измерений минимум при $\alpha \approx 10^\circ$ (Jaumann и др., 1992). При активизации оптических космических исследований Луны в 1990-х гг. (миссии Galileo, 1990 г. и Clementine, 1994 г.) были получены новые спектрофотометрические данные высокого разре-

шения. В работе (Shkuratov и др., 1999) приведены фазовые зависимости нормированных показателей цвета в различных участках спектра (950/750 нм и 750/415 нм), построенные по данным КА Clementine. Для диапазона фазовых углов 3° – 50° наблюдается монотонный рост показателей цвета Луны с увеличением фазового угла. Эти результаты находятся в согласии с ранними наземными наблюдениями Луны (Mikhail, 1970; Lane, Irvine, 1973). По данным (Shkuratov и др., 1999) относительное изменение показателя цвета (750/415 нм) в диапазоне фазовых углов 3° – 50° составляет $\sim 18\%$, а для показателя цвета (950/750 нм) – $\sim 7\%$. Следует сказать, что амплитуда фазового цветового эффекта невелика, и существует немного рядов спектрофотометрических наблюдений Луны, выполненных с достаточной точностью в широком диапазоне углов фаз, позволяющих уверенно его проследить. Так, Корохин и др. (2007) выполнили новую калибровку старых данных интегральной спектрофотометрии Rougier (1933), а также Lane, Irvine (1973), что позволило оценить изменение наклона спектра в диапазоне длин волн 360–1060 нм от угла фазы для всего видимого полушария Луны. Эти данные подтверждают, что лунная поверхность краснеет с ростом фазового угла. Кроме этого, Корохин и др. (2007) указывают на немонотонное изменение наклона спектра: наличие у кривой минимума при фазовом угле $\sim 10^\circ$ и максимума в районе 55° . Измерения фазового хода показателя цвета по данным космической миссии SELENE были недавно проведены группой японских исследователей для материковых участков на обратной стороне Луны (Yokota и др., 2009). Получены синтетические зависимости показателей цвета 1000/750, 1250/750, 1550/750, 1680/750 нм в диапазоне 0° – 85° . Амплитуда фазового хода показателя цвета 1000/750 нм согласуется с данными КА Clementine, также подтверждается немонотонность фазовой зависимости цвета с максимумом $\alpha \approx 65^\circ$.

Лабораторная колориметрия образцов лунного грунта и их аналогов

Одной из первых и основополагающих работ по лабораторному исследованию фазовой зависимости показателя цвета порошкообразных образцов различных силикатов, возможных аналогов грунта небесных тел, можно считать работу (Adams, Filice, 1967). В частности, указанными авторами было показано, что порошки базальта и некоторых других пород демонстрируют максимум показателя цвета $C(600/400 \text{ нм})$ при больших фазовых углах. Немонотонный ход функции $C(\alpha)$ для малых фазовых углов был впервые обнаружен у образцов лунного грунта в работах (O'Leary, Briggs, 1970; 1973). Наличие минимума у зависимости $C(600/400 \text{ нм})$ от α в диапазоне $\alpha \approx 5^\circ$ – 15° для морского грунта показано в рабо-

тах (Akimov и др., 1979; Акимов и др., 1980; Шкуратов и др., 1996).

В работах (Gradie и др., 1980a; 1980b) изучалось влияние геометрии светорассеяния на поведение спектров отражения разнообразных порошкообразных образцов. Были исследованы метеориты-хондриты, базальт разного состава, пироксен и желтая сера. В частности, было показано, что колориндекс образца пироксена по мере увеличения фазового угла от 4° до 60° увеличивается, примерно на 10%, а затем покраснение уменьшается и происходит существенное снижение контраста спектральных полос поглощения (особенно при очень больших углах фазы, например, при $\alpha = 120^\circ$). У базальта с альбедо 22% максимум показателя цвета наблюдается при фазовом угле 90° – 100° . На основании данных (Gradie и др., 1980a, 1980b) была выявлена тенденция, что у более темных образцов максимум у фазовой зависимости $C(700/400 \text{ нм})$ находится на больших α , чем у светлых, что также согласуется с работой (Adams, Filice, 1967).

Уточненные зависимости показателя цвета $C(650/430 \text{ нм})$ от α для лунных образцов из мест посадки КА Луна-16, -20, -24 представлены в работе (Шкуратов и др., 1996). Авторы указывают на разные зависимости $C(\alpha)$ для образцов различного гранулометрического состава. Сравнение образцов морского (КА Луна-16) и материкового (КА Луна-20) грунта показывает разный ход $C(\alpha)$ как для малых ($<15^\circ$), так и больших ($>50^\circ$) углов фаз. Указывается, что максимум зависимости $C(\alpha)$ может наблюдаться для углов ($\alpha > 60^\circ$). В среднем при изменении α от 0° до 60° колор-индекс образцов изменяется на 5%–7%.

Лабораторные измерения спектров образцов грунта, доставленных в ходе миссий Apollo-11, -12, -14, -16, проведены для различной геометрии светорассеяния в работе (Pieters и др., 1991). Спектры измерялись в диапазоне от 350 до 2500 нм для фазовых углов 10° – 110° . Тенденция увеличения наклона спектров этих образцов лунного грунта с увеличением фазового угла уверенно подтвердилась. У зависимости $C(\alpha)$ для длин волн видимого диапазона наблюдается широкий плоский максимум при $\alpha = 60^\circ$ – 100° (зависит от образца). Было отмечено, что при приближении к оппозиционной геометрии светорассеяния ($\alpha \rightarrow 0$) уменьшается спектральный контраст в полосах поглощения на 1000 и 2000 нм.

Суммируя результаты лабораторных исследований фазового хода показателя цвета и данные телескопических и космических измерений Луны, отметим, что геометрия светорассеяния в эксперименте заметно влияет на спектральные кривые. Детальный вид функции $C(\alpha)$ несколько разный у образцов морского и материкового грунта. Вопрос о немонотонности функции $C(\alpha)$ для различных районов лунной поверхности остается открытым. Таким образом, необходимо дополнительно изучить распределение показателя цвета по лунной поверх-

ности при разных фазовых углах. Результаты такой работы будут, в частности, полезны при калибровке спектральных космических данных, полученных KA Change-1, SELENE, Chandrayaan-1 и LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter). В данной работе мы картографируем распределения фазовых отношений показателя цвета $C(\alpha_1)/C(\alpha_2)$ для двух лунных регионов, используя данные телескопических наблюдений. Полученные распределения позволяют судить об относительных фазовых вариациях показателя цвета для разных типов поверхности Луны.

ИСХОДНЫЕ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

Телескопические наблюдения Луны проводились с использованием цифровой фотокамеры; строились изображения фазовых отношений показателя цвета $C(600/470 \text{ нм})$ для различных фазовых углов в интервале от 2° до 95° .

Наблюдательный материал. Наблюдения Луны были выполнены в сентябре–октябре 2006 г. на Майданакской высокогорной обсерватории (Узбекистан) с отличным астроклиматом. Некоторые результаты проведенных наблюдений (фотополяриметрия) уже публиковались (Кайдаш и др., 2009; Опанасенко и др., 2009). В данной работе использованы колориметрические наблюдения на 50-см Харьковском зеркальном телескопе, оснащенный цифровой фотокамерой Canon EOS 350D. Приемником излучения в этой камере является КМОП-матрица (CMOS array) размером 3474×2314 пикселей. Динамический диапазон матрицы составляет 4096 отсчетов яркости. Матрица содержит повторяющуюся структуру пикселей RGGB со спектральной чувствительностью в трех широких полосах (эффективные длины волн — R: $\lambda_{\text{eff}} = 610 \text{ нм}$, G: $\lambda_{\text{eff}} = 540 \text{ нм}$, B: $\lambda_{\text{eff}} = 480 \text{ нм}$), что дает возможность одновременно получать изображение Луны сразу в трех спектральных каналах. На рис. 1 представлены кривые спектральной чувствительности цветовых каналов камеры Canon 350D по данным (Buil, 2007). Все кривые на рис. 1 нормированы на свои максимумы. Эквивалентная ширина полос пропускания $\sim 100 \text{ нм}$, при этом синий B и красный R каналы практически не перекрываются.

Съемка осуществлялась в режиме “Raw” с отключенной аппаратной предобработкой значений пикселей. Процедура стандартной обработки исходных данных включает в себя вычитание электрического нуля, индивидуального для каждого кадра, учет постоянного смещения сигнала (bias), путем усреднения большого числа темновых кадров, учет плоского поля (неравномерность чувствительности) системы “камера 350D + телескоп”. К недостаткам КМОП-приемников относят большие по сравнению с ПЗС отклонения от линейности. В результате многих тестовых измерений мы опреде-

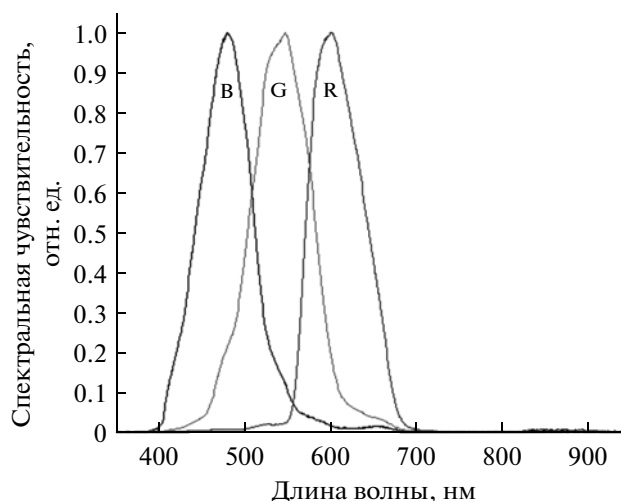


Рис. 1. Спектральная чувствительность цветовых каналов камеры Canon 350D по данным (Buil, 2007). Все кривые нормированы на максимумы.

лили, что в верхней четверти динамического диапазона (т.е. при отсчетах яркости >3000) существуют заметные отклонения от линейности, и в дальнейшем использовали только диапазон отсчетов 0–3000 единиц. После применения перечисленных процедур значения пикселей изображений стали пропорциональны яркости лунной поверхности.

С целью повышения точности спектрофотометрии нами были разработаны программы для обработки серий изображений, включая коррекцию за атмосферные искажения. Для устранения крупно- и мелкомасштабных сдвигов изображений участков поверхности Луны, вызванных турбулентностью атмосферы, проводилось поэтапное (с изменяющимся размером окна совмещения) мягкое совмещение изображений в данной серии (Кайдаш и др., 2009). Совмещенные изображения в серии усреднялись, и получалось результирующее изображение яркости поверхности. Все результирующие изображения путем селенографической привязки сводились в единую ортографическую проекцию. Эффективное теоретическое угловое разрешение системы “камера 350D + телескоп” составляет $0.24''$ с на пиксел в канале G, и $0.34''$ с на пиксел в каналах R и B. После усреднения серии изображений на снимках удается уверенно разрешать детали размером около $0.5''$.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ ОТНОШЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЯ ЦВЕТА

В нашем распоряжении имеются изображения участков видимого полушария Луны, полученные в широком диапазоне фазовых углов. Этот обширный материал может быть использован для построения изображений, передающих распределение фазовых отношений, когда находится частное двух

изображений одного и того же участка поверхности, полученных при различных фазовых углах. Таким образом, пространственные вариации яркости на частном подавляются, остаются лишь вариации наклона фотометрической функции в исследуемом диапазоне углов фаз (Kreslavsky, Shkuratov, 2003; Кайдаш и др., 2009; Kaydash и др., 2009). В данной работе мы распространяем этот метод на распределения колор-индекса: строится частное изображений колор-индекса одного и того же участка, полученных при различных фазовых углах.

Поскольку исходные данные не имеют пока абсолютной фотометрической калибровки, все наши оценки особенностей фазового хода показателя цвета относительны, то есть мы ищем отличия в фазовом ходе $C(\alpha)$ для разных участков лунной поверхности, не определяя вид абсолютной зависимости $C(\alpha)$. Для сопоставимости изображений, передающих распределение фазовых отношений показателя цвета (далее ФОПЦ), они представлены в одной шкале и нормированы по единому для всех изображений участку, включающему морскую и материковую области примерно в равных соотношениях. После нормировки вариации ФОПЦ стали примерно симметричными относительно единицы. Все нормированные таким образом ФОПЦ представлены в динамическом диапазоне отсчетов 0.97...1.03. Фазовый ход показателя цвета $C(600/470 \text{ нм})$ исследован нами для двух лунных участков: 1) восточная часть лунного диска — Море Ясности, Море Спокойствия и окружающие материковые районы, 2) западная часть диска — район Моря Влажности и южной части Океана Бурь.

На рис. 2 представлены изображения участка восточной части лунного диска. Распределение яркости поверхности в канале G приведено на рис. 2а. Это изображение представляет собой мозаику отдельных изображений яркости, полученных при разных фазовых углах. Мозаика представлена в ортографической проекции. Звездочкой обозначено место посадки КК Apollo-11. На рис. 2б показано распределение показателя цвета, полученное делением изображений в красном R и синем B каналах (также в виде мозаики). Большая часть этой мозаики образована изображением распределения показателя цвета при угле фазы 21° , остальные фрагменты получены при других углах и состыкованы с учетом фазового хода показателя цвета этого участка (см. ниже). Композиционное изображение для показателя цвета нормировано на значение в небольшом альбедно и колориметрически однородном участке на юге Моря Ясности (крестик на рис. 2б). Этот участок совпадает со спектрофотометрическим стандартом MS-2 (Pieters, 1986). Более светлый тон на распределении показателя цвета соответствует “красным” участкам лунной поверхности. Вариации показателя цвета на рис. 2б составляют ~14%. На изображении видны региональные особенности распределения показателя цвета: “красное” Море

Ясности граничит с “синим” Морем Спокойствия, яркие молодые кратеры на материке практически неотличимы от окружающего материка, морской материал вокруг кратера Тарунций (5.6°N , 46.5°E) имеет высокие значения показателя цвета, характерные для материкового вещества.

Распределения ФОПЦ $C(5^\circ)/C(15^\circ)$ и $C(6^\circ)/C(21^\circ)$ представлены, соответственно, на рис. 2в и 2г. Оба распределения показывают превышение значений указанных отношений у всех морских участков по сравнению с материком на 3%–4%; различия видны, также, при сравнении ФОПЦ для Моря Ясности и Моря Спокойствия, на уровне 1%–2%. В общем представленные распределения антикоррелируют с распределением альбедо. Отметим, что на материке сильно подавлен контраст альбедных вариаций, не видны яркие кратеры, почти не видна лучевая система кратера Прокл. Интерпретировать видимые на изображениях вариации $C(\alpha_1)/C(\alpha_2)$, где $\alpha_1 < \alpha_2$, необходимо следующим образом: большие значения этого отношения соответствуют меньшему наклону фазовой зависимости показателя цвета. Другими словами, фазовая зависимость цвета для материков круче (или ее наклон больше), чем для морей, при выполнении следующего условия:

$$\frac{C(\alpha_1)}{C(\alpha_2)_{\text{материк}}} < \frac{C(\alpha_1)}{C(\alpha_2)_{\text{море}}} \quad (1)$$

Соответственно, мы говорим о более пологой фазовой зависимости цвета для материков (т. е. о зависимости с меньшим наклоном) по сравнению с морями в случае выполнения обратного условия:

$$\frac{C(\alpha_1)}{C(\alpha_2)_{\text{материк}}} > \frac{C(\alpha_1)}{C(\alpha_2)_{\text{море}}} \quad (2)$$

Таким образом, из рис. 2в, 2г следует, что при углах фазы от 5° до 21° фазовая зависимость показателя цвета для морей более пологая, чем для материка.

При переходе к большим фазовым углам различия между морем и материком по параметру ФОПЦ существенно уменьшаются (см. рис. 2д, $C(21^\circ)/C(48^\circ)$), составляя ~1%–1.5%. Слабая антикорреляция с альбедо и цветом все еще заметна на этом изображении. Таким образом, наклон фазовой кривой цвета материковых регионов в диапазоне углов фаз $\sim 20^\circ$ – 50° лишь немного превышает аналогичный наклон для морского типа поверхности. На распределении $C(48^\circ)/C(62^\circ)$ практически не видны какие-либо контрастные детали (рис. 2е). Тем не менее анализ изображения показывает, что у материка на севере значения ФОПЦ немного выше, чем у Моря Ясности (на 0.3%). Таким образом, видны признаки прямой корреляции ФОПЦ с альбедо. Другими словами, материковый материал показывает такую же (отчасти даже более пологую) зависимость цвета от фазового угла, как и морской грунт для данного диапазона изменения угла α .

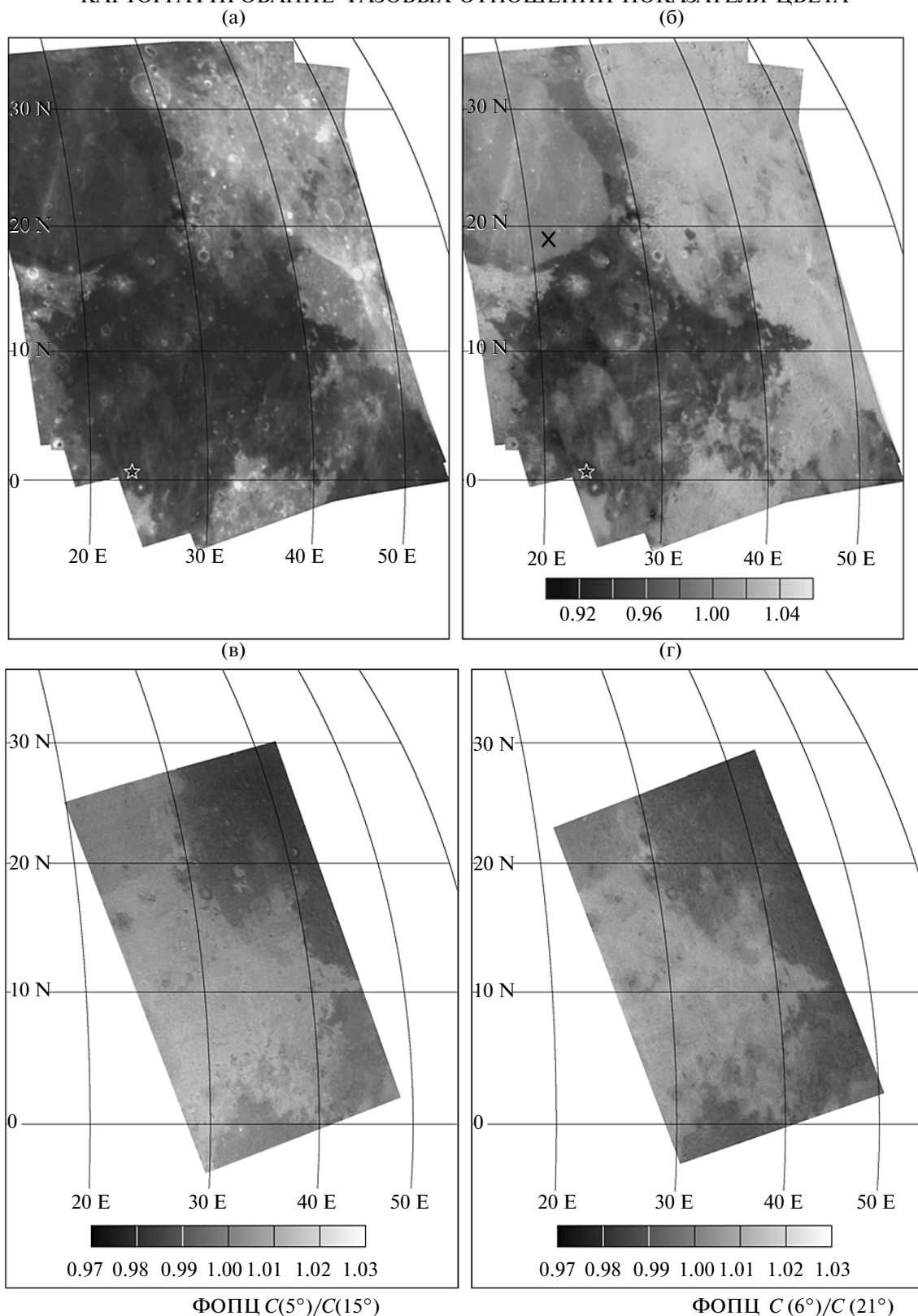


Рис. 2. Картографирование цветовых фазовых отношений для участка восточной части видимого полушария Луны. Звездочкой указано место посадки КК Apollo-11. Проекция ортографическая. (а) – Распределение альbedo лунной поверхности в канале G (мозаика кадров). (б) – Распределение показателя цвета $C(600/470 \text{ nm})$ (мозаика), крестиком обозначен участок, использованный для нормировки карты цвета. (в) – Фазовое отношение показателя цвета $C(5^\circ)/C(15^\circ)$. (г) – Фазовое отношение показателя цвета $C(6^\circ)/C(21^\circ)$. (д) – Фазовое отношение показателя цвета $C(21^\circ)/C(48^\circ)$. (е) – Фазовое отношение показателя цвета $C(48^\circ)/C(62^\circ)$. (ж) – Фазовое отношение показателя цвета $C(62^\circ)/C(88^\circ)$. (з) – Фазовое отношение показателя цвета $C(75^\circ)/C(94^\circ)$.

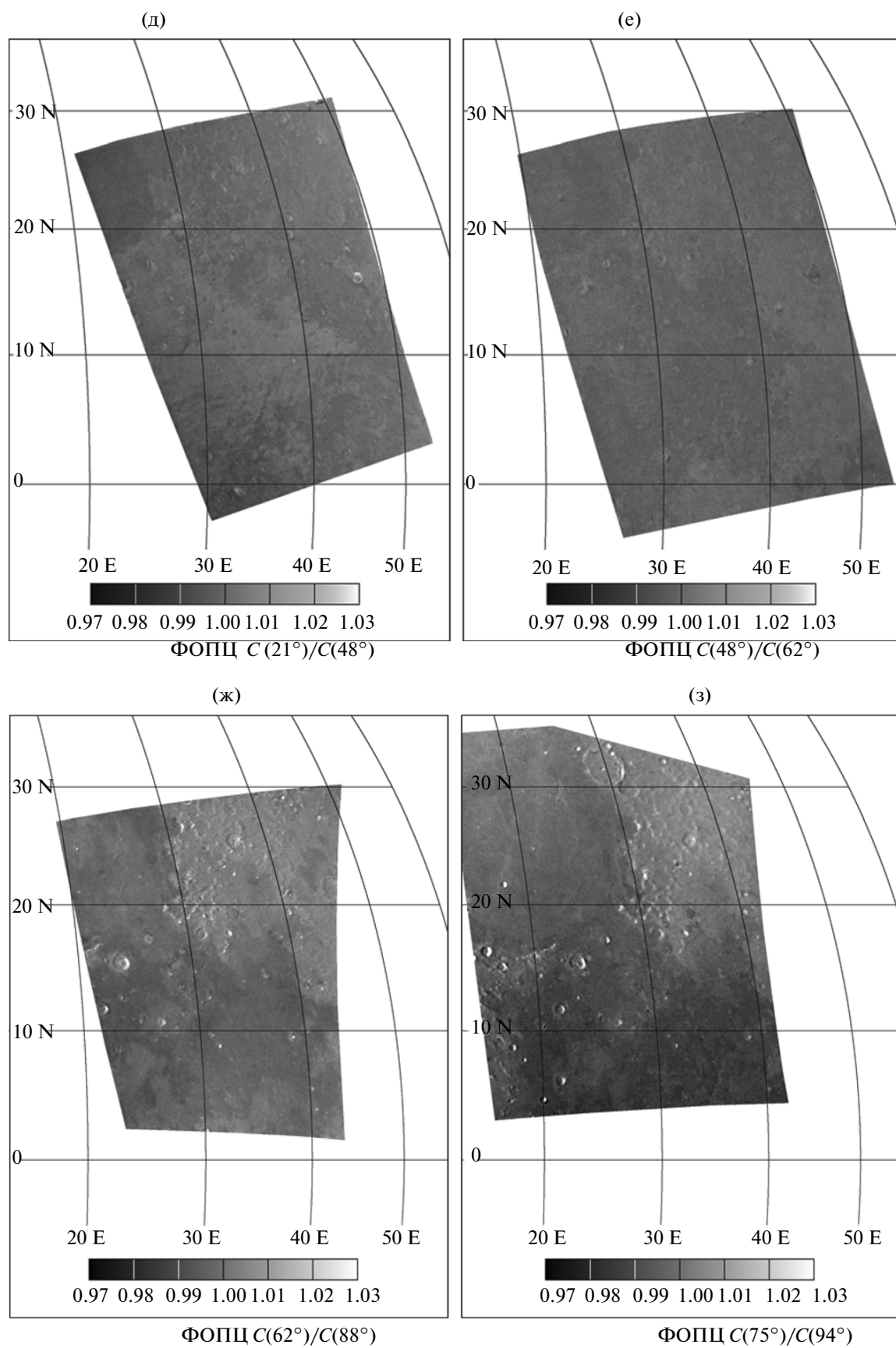


Рис. 2. Продолжение.

При углах фазы более 60° контраст море/материк на изображении ФОПЦ инвертируется и начинает увеличиваться, составляя, например, для $C(62^\circ)/C(88^\circ)$ около 2% (рис. 2ж); на распределении $C(62^\circ)/C(88^\circ)$ признаки прямой корреляции с альбедо видны совершенно отчетливо. На поверхности морей наблюдаются некоторые вариации ФОПЦ (по уровню 1%), особенно в местах, осложненных альбедными деталями. Контраст Моря Ясности и Моря Спокойствия становится отчетливо виден на распределении $C(75^\circ)/C(94^\circ)$, причем для Моря Ясности среднее значение ФОПЦ составляет $\sim 1.01\%$, а отдельные участки Моря Спокойствия характеризуются значениями $0.98\%–0.99\%$ (рис. 2з). ФОПЦ для материка к северо-востоку составляет $\sim 1.02\%$. Здесь мы опять отмечаем прямую корреляцию ФОПЦ с альбедо и, отчасти, цветом.

Аналогичное исследование проведено нами для участка западной части видимого полушария, охватывающего район Моря Влажности, южной части Океана Бурь, фрагменты лучевых систем кратеров Тихо и Коперника, а также южного материка (рис. 3). Мозаика изображений яркости в канале G представлена на рис. 3а в ортографической проекции. Места посадок КК Apollo-12 и Apollo-14, где были взяты образцы грунта, изученные спектрофотометрически в работе (Pieters и др., 1991), обозначены звездочками. Мозаика изображений колориндекса для данного района показана на рис. 3б. Нормировка композиционного изображения цвета проводилась по участку в море Влажности южнее кратера Гассенди. Этот участок (обозначен крестиком на рис. 3б) известен как спектрофотометрический стандарт МН-1А (Pieters, 1986). На колориметрическом изображении заметны отличия западной и восточной части Моря Влажности; выделяются также “синий” морской участок в районе кратера Флемстид и некоторые детали в морских районах на юге Океана Бурь. Вариации показателя цвета составляют примерно 13%.

На распределении $C(2^\circ)/C(11^\circ)$ морские участки имеют систематически более высокие значения этого отношения по сравнению с материком (рис. 3в). Средний контраст море/материк составляет 2%–3%. Наиболее низкие значения дают кратер Гассенди и южная часть гор Рифей. Как и в предыдущем случае, при таких углах фазы наблюдается антикорреляция ФОПЦ с альбедо поверхности. Продвижение в область углов фаз $>10^\circ$ приводит к быстрому падению контраста море/материк, что видно по распределению $C(11^\circ)/C(23^\circ)$ (рис. 3г). Разница ФОПЦ на базе углов $11^\circ–23^\circ$ составляет не более 1%–1.5%. Материковые участки имеют здесь несколько более крутой ход фазовой зависимости цвета, на фоне общего слабого контраста видны цветовые детали в верхней части изображения.

Примеры почти полного исчезновения корреляции ФОПЦ с альбедо поверхности приведены на

рис. 3д, 3е, где показаны распределения $C(23^\circ)/C(44^\circ)$ и $C(44^\circ)/C(57^\circ)$, соответственно. На рис. 3д превышение отсчетов в морских районах над материковыми едва больше уровня шума изображения. В диапазоне углов $44^\circ–57^\circ$ фазовые зависимости показателя цвета для моря и материка практически одинаковы. На рис. 3ж, 3з приведены изображения для параметров $C(44^\circ)/C(96^\circ)$ и $C(57^\circ)/C(96^\circ)$. Эти изображения весьма похожи на распределение альбедо. Наименьшее значение параметра ФОПЦ имеет небольшой участок на юге Моря Влажности. Материк имеет значения параметров $C(44^\circ)/C(96^\circ)$ и $C(57^\circ)/C(96^\circ)$ на $\sim 3\%$ больше, чем морские районы.

Суммируя результаты, полученные в этом разделе, отметим следующие закономерности. При достаточно малых фазовых углах ФОПЦ антикоррелируют с альбедо. По мере продвижения в область больших фазовых углов корреляция ослабевает, наблюдается уменьшение контраста море/материк на изображении ФОПЦ. При дальнейшем увеличении фазовых углов (в области $40^\circ–50^\circ$) происходит инверсия контраста море/материк, а затем возникает прямая корреляция ФОПЦ с альбедо. Другими словами: по мере увеличения α фазовая зависимость показателя цвета моря по отношению к матерiku вначале более пологая согласно формуле (1), затем она уравнивается с материковой зависимостью, и, при больших α , становится круче материковой согласно формуле (2).

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОБРАЗЦОВ ЛУННОГО ГРУНТА

Результаты, полученные в предыдущем разделе, базируются на данных колориметрии Луны. Различия в фазовой зависимости цвета морей и материков, которые мы обнаружили, составляют не более 3%–4% (в зависимости от диапазона α). Поскольку величина эффекта мала, представляется важным получить его независимое подтверждение. Для этого мы использовали данные лабораторных спектрофотометрических исследований образцов лунного грунта, проведенных в университете Брауна (США).

В 1990–1991 гг. в период проведения исследований Луны космической миссией Galileo и подготовки лунной миссии Clementine в лаборатории университета Брауна (RELAB) были измерены спектры отражения нескольких образцов лунного грунта в диапазоне от 350 до 2500 нм со спектральным разрешением 10 нм. Спектрометры RELAB дают возможность измерять отражательную способность материалов в ближнем УФ-, видимом, и ИК-диапазонах спектра (Pieters, Hiroi, 2004). Измерения образцов были проведены в диапазоне фазовых углов $10^\circ–110^\circ$ при различных комбинациях углов падения (i) и отражения (e) света (Pieters и др., 1991). В таблице указаны эти углы. При этих измерениях нормаль поверхности образца

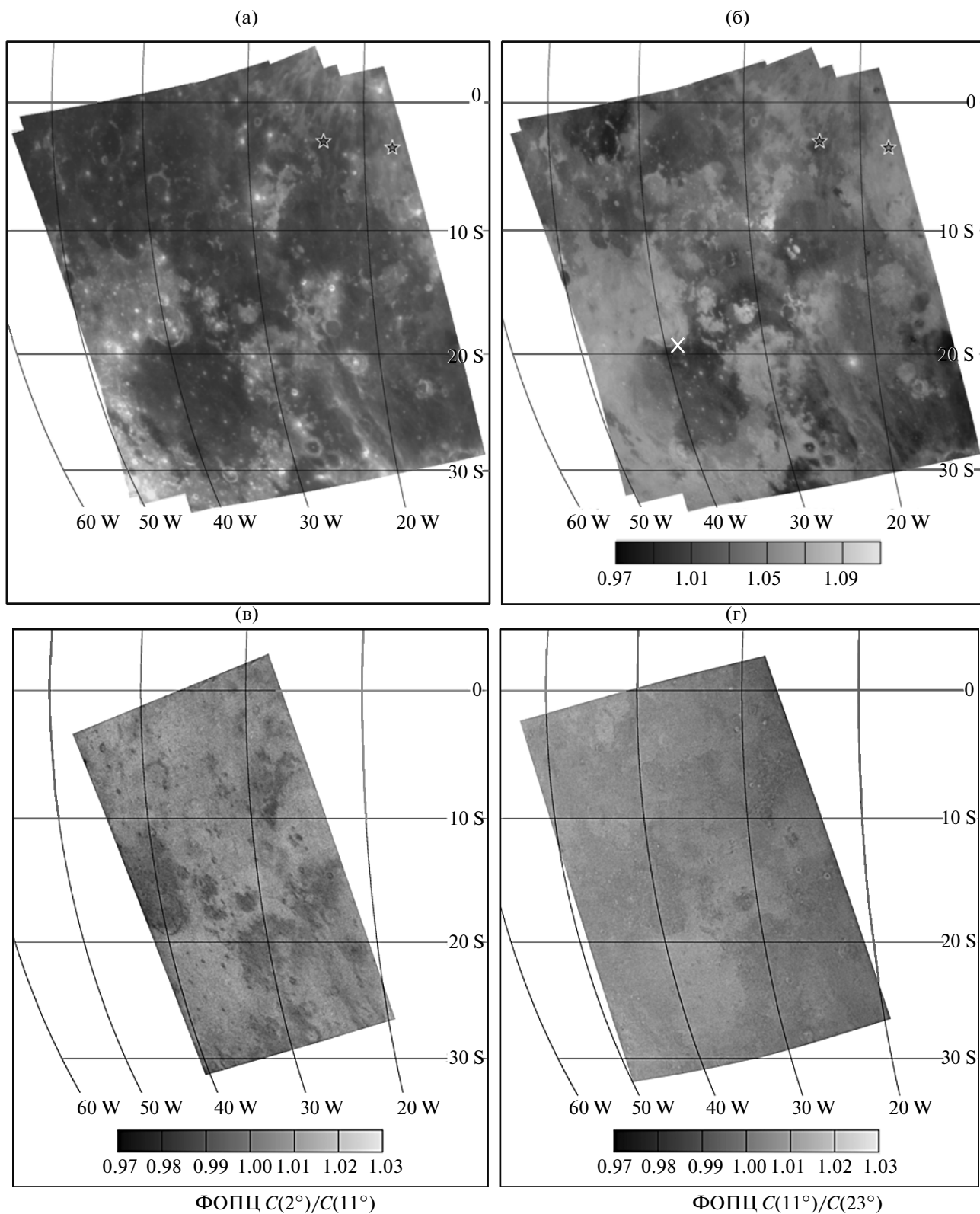


Рис. 3. Картографирование цветовых фазовых отношений для участка западной части видимого полушария Луны. Звездочками указаны места посадки КК Apollo-12 и Apollo-14. Проекция ортографическая. (а) – Распределение альбедо в канале G (мозаика). (б) – Распределение показателя цвета $C(600/470 \text{ nm})$, крестиком обозначен участок, использованный для нормирования карты цвета. (в) – Фазовое отношение показателя цвета $C(2^\circ)/C(11^\circ)$. (г) – Фазовое отношение показателя цвета $C(11^\circ)/C(23^\circ)$. (д) – Фазовое отношение показателя цвета $C(23^\circ)/C(44^\circ)$. (е) – Фазовое отношение показателя цвета $C(44^\circ)/C(57^\circ)$. (ж) – Фазовое отношение показателя цвета $C(44^\circ)/C(96^\circ)$. (з) – Фазовое отношение показателя цвета $C(57^\circ)/C(96^\circ)$.

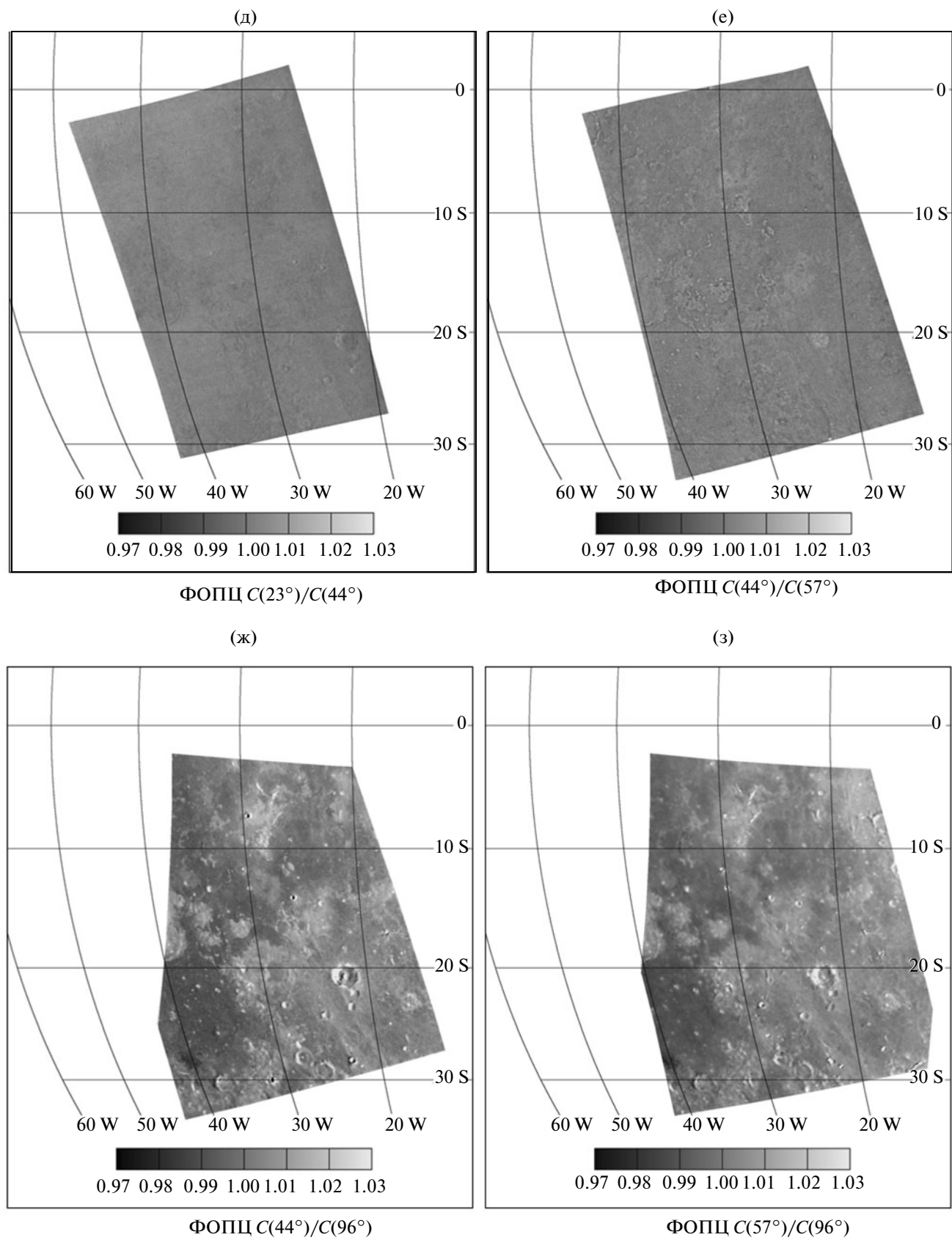


Рис. 3. Продолжение.

Геометрия падения/отражения при спектрофотометрии лунных образцов в RELAB

Фазовый угол, град	Угол падения/отражения, град		
10	10/0		
20	60/40	20/0	20/40
30	30/0	40/10	20/50
40	60/20	20/60	10/50
60	60/0	20/−40	
70	60/−10		
80	60/−20	20/−60	
100	60/−40	40/−60	
110	60/−50		

всегда лежала в плоскости рассеяния; отрицательные значения угла e соответствуют случаю, когда падающие и отраженные лучи лежат в плоскости рассеяния по разные стороны от нормали образца. Данные измерений доступны в сети Интернет: <http://www.planetary.brown.edu/relab/>. Исследовались четыре зрелых образца лунного грунта: 62231.14 – Apollo-16, материковый грунт; 14259.15 – Apollo-14, материковый грунт; 12070.853 – Apollo-12, морской грунт; 10084.255 – Apollo-11, морской грунт.

Все образцы не фракционированы по размерам частиц (частицы <1 мм). Мы выбрали 22 спектра для каждого образца с учетом повторяющихся измерений при одинаковой геометрии освещения/наблюдения и наличии данной геометрии для спектра каждого из четырех образцов. На рис. 4 мы приводим спектры образцов для всех имеющихся геометрий освещения/наблюдения. Из всего спектра показан только интервал 400–700 нм, который перекрывает каналы В и R камеры Canon 350D (рис. 1). Спектры нормированы на длину волны 700 нм; они почти линейны в этом диапазоне длин волн. На рис. 4а показаны спектры для образца материкового грунта (КК Apollo-16), на рис. 4б – для образца морского грунта (КК Apollo-11). Два спектра на рис. 4а выделены, чтобы указать геометрию светорассеяния, при которой реализуется экстремальный наклон спектра. Таким образом, для образца материкового грунта наименьший наклон спектра соответствует геометрии рассеяния ($i = 10^\circ$, $e = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$). Наибольший наклон соответствует геометрии ($i = 60^\circ$, $e = -20^\circ$, $\alpha = 80^\circ$). Образец морского грунта (КК Apollo-11) также имеет наименьший наклон спектра для геометрии ($i = 10^\circ$, $e = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$), наибольший наклон реализуется для гео-

метрий ($i = 60^\circ$, $e = -20^\circ$, $\alpha = 80^\circ$) и ($i = 40^\circ$, $e = -60^\circ$, $\alpha = 100^\circ$). Соответствующие значения указаны на рис. 4а и 4б.

Используя представленные данные спектрофотометрии лунных образцов, мы решили смоделировать ФОПЦ для условного моря и материка с целью проверки результатов, представленных выше. Здесь необходимо отметить, что отнесение образцов, доставленных КК Apollo, к “морскому” и “материковому” типу требует осторожности. Так, в обзоре (Jolliff и др., 2006) указывается, что грунт из места посадки КК Apollo-11 содержит до 28% неморского материала, близкого по составу равнинам Кэли (Cayley Plains) в месте посадки КК Apollo-16. Материал морского и материкового грунта, доставленного КК Apollo-12 и Apollo-14, следует рассматривать как отдельную группу в связи с наличием в этих образцах материала KREEP (калий, редкоземельные элементы, фосфор) (Jolliff и др., 2006). Таким образом, рассмотрение образцов грунта из мест посадок КК Apollo-11 и Apollo-16 как цветовых аналогов моря и материка, соответственно, является довольно условным. То же касается пары образцов из мест посадки КК Apollo-12 (море) и Apollo-14 (материк).

Лабораторные спектры получены с высоким разрешением – 10 нм. Для имитации телескопической спектрофотометрии мы свернули эти спектры с полосами пропускания каналов R и В камеры Canon 350D (см. рис. 1) и затем вычислили параметр $C(600/470)$ нм для каждого спектра. Значения этого параметра для спектров, полученных при одном угле фазы, усреднялись; затем были построены “морские” и “материковые” фазовые зависимости цвета. Эти зависимости для пары образцов (Apollo-11) и (Apollo-16), а также пары (Apollo-12) и (Apollo-14) представлены на рис. 5а и 5б, соответственно. Каждая фазовая кривая нормирована на свое значение при $\alpha = 10^\circ$. Здесь точками показаны значения показателя цвета для каждого значения фазового угла из таблицы. Хотя на рис. 5 наблюдается большой разброс точек, вместе с тем, видна следующая тенденция. Для углов фаз $\alpha \leq 40^\circ$ отношение $C(\alpha_1)/C(\alpha_2)$, где $\alpha_1 < \alpha_2$, для морского грунта больше, чем для материкового (рис. 5а); другими словами, фазовая зависимость показателя цвета моря более пологая, чем фазовая зависимость для материка. Для углов фаз $\alpha > 40^\circ$ (рис. 5а) ситуация меняется на противоположную: $C(\alpha_1)/C(\alpha_2)$ уже больше для материкового грунта. Это значит, что фазовая зависимость показателя цвета материкового вещества имеет меньший наклон по сравнению с морским грунтом. Аналогичное изменение соотношения $C(\alpha_1)/C(\alpha_2)$ для моря и материка прослеживается на рис. 5б для углов фаз $\alpha \approx 40^\circ$ – 60° . Для иллюстрации этого вывода и более наглядного сравнения с результатами картографирования ФОПЦ для Луны мы разделили зависимости $C(\alpha)$

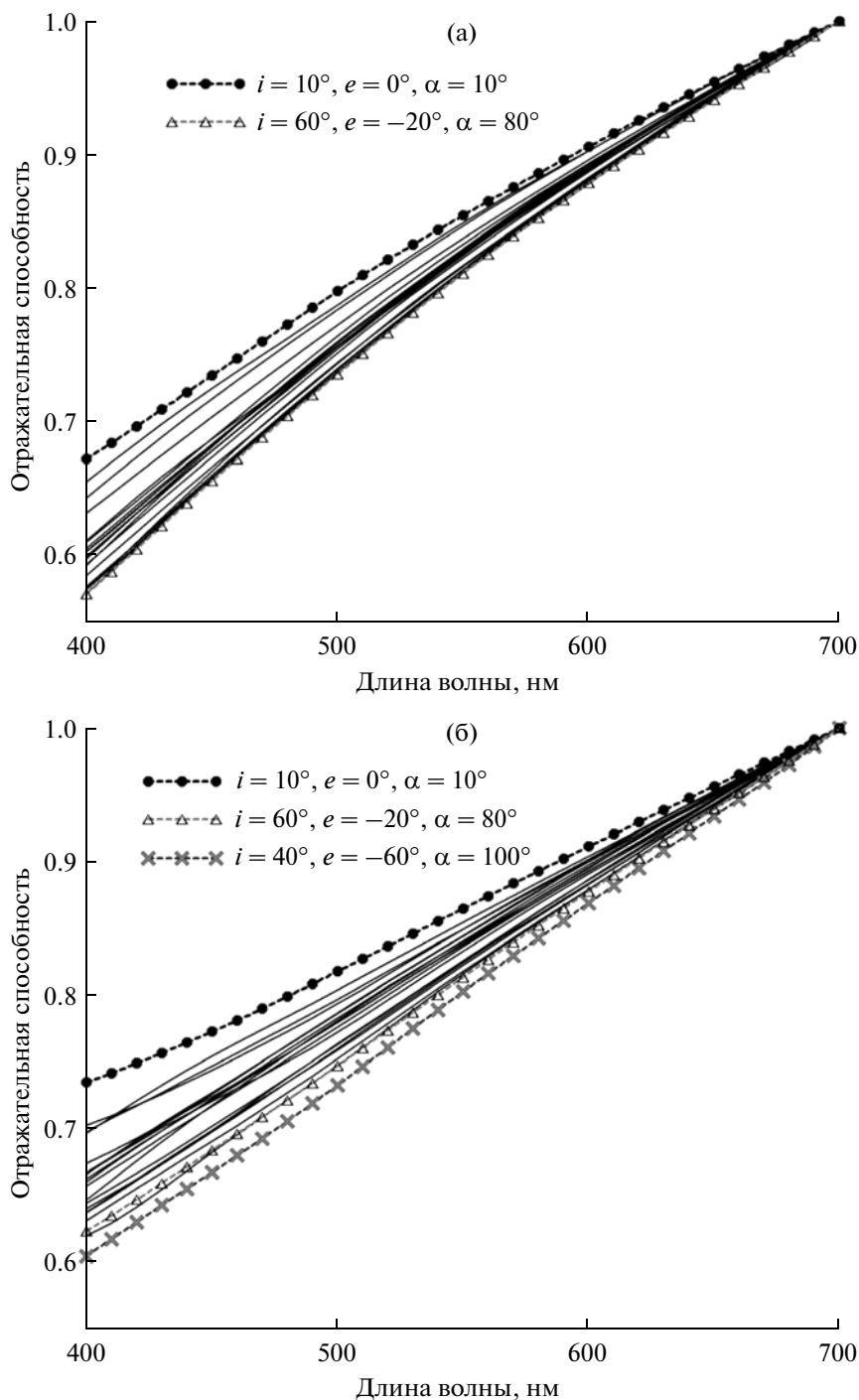


Рис. 4. Спектры образцов лунного грунта для различной геометрии освещения/наблюдения (измерения RELAB). Спектры нормированы на длину волны 700 нм. (а) — Образец 62231.14 материкового грунта (КК Apollo-16). Выделены спектры, характеризующиеся экстремальными значениями показателя цвета — ($i = 10^\circ, e = 0^\circ, \alpha = 10^\circ$), ($i = 60^\circ, e = -20^\circ, \alpha = 80^\circ$). (б) — образец 10084.255 морского грунта (КК Apollo-11). Выделены спектры, характеризующиеся экстремальными значениями показателя цвета — ($i = 10^\circ, e = 0^\circ, \alpha = 10^\circ$), ($i = 60^\circ, e = -20^\circ, \alpha = 80^\circ$) и ($i = 40^\circ, e = -60^\circ, \alpha = 100^\circ$).

для моря и материка (рис. 6). На рисунке точками показаны отношения показателей цвета для каждого значения фазового угла из таблицы, а кривые аппроксимируют зависимости кубическим полиномом. На рис. 6а показана фазовая зависи-

мость $C_{A-11}(\alpha)/C_{A-16}(\alpha)$, а на рис. 6б — фазовая зависимость $C_{A-12}(\alpha)/C_{A-14}(\alpha)$. Здесь более отчетливо видна тенденция к изменению фазового наклона цвета моря относительно материка при переходе через фазовые углы 40° – 60° . Заметим, что

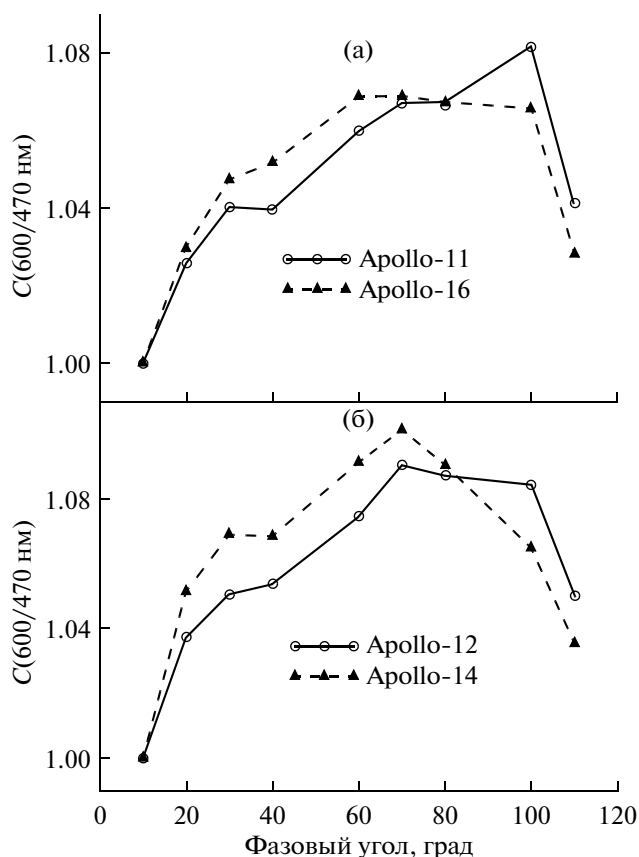


Рис. 5. Фазовые зависимости показателя цвета $C(600/470 \text{ нм})$, рассчитанные по данным спектрофотометрии образцов лунного грунта (RELAB). (а) — Зависимости для образцов из места посадки КК Apollo-11 и Apollo-16. (б) — Зависимости для образцов, доставленных КК Apollo-12 и Apollo-14.

небольшие амплитуды отношений $C_{A-11}(\alpha)/C_{A-16}(\alpha)$ и $C_{A-12}(\alpha)/C_{A-14}(\alpha)$, составляющие $\sim 2.5\%$ и $\sim 4\%$ соответственно заставляют с осторожностью относиться к оценкам положения минимума кривых на рис. 6. Тем не менее амплитуды этих отношений для разных диапазонов фазовых углов близки к тем, что получены по телескопическим наблюдениям Луны (рис. 2 и 3). Так, например, отношение значений параметра $C(57^\circ)/C(96^\circ)$ для мест посадок Apollo-12 и Apollo-14 по телескопическим данным составляет $\sim 2\%$ (рис. 3з), что согласуется с оценкой $\sim 2.5\%$ для такого же отношения $C_{A-12}(\alpha)/C_{A-14}(\alpha)$ (рис. 6б). Положение минимума кривой (40° – 60°) в целом согласуется с оценкой (40° – 50°), сделанной по данным колориметрии Луны. Некоторые свидетельства в пользу немонотонности фазовой зависимости $C_{\text{море}}(\alpha)/C_{\text{материк}}(\alpha)$ можно обнаружить в работе (Шкуратов и др., 1996), где изучались фазовые кривые показателя цвета $C(650/430 \text{ нм})$ для образцов, доставленных КА Луна-16, Луна-20 и Луна-24. Сравнение соответствующих зависимостей для образцов материкового (КА Луна-20, образец 2002-

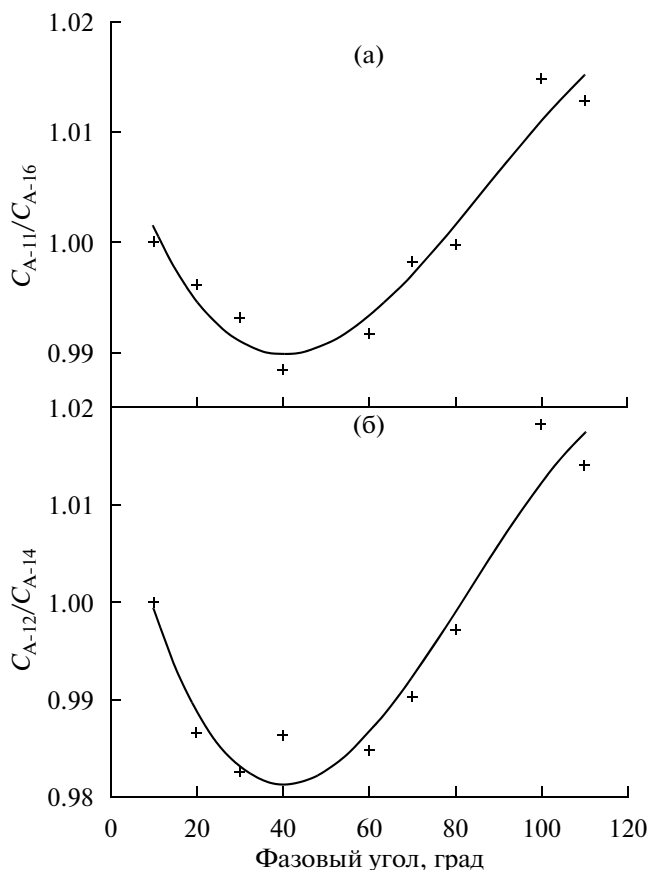


Рис. 6. Отношение фазовых зависимостей цвета образцов морского и материкового грунта. (а) — Фазовая зависимость показателя цвета для образца из места посадки КК Apollo-11, разделенная на аналогичную зависимость для образца, доставленного КК Apollo-16 (по данным рис. 5а). Каждая точка на графике представляет собой отношение показателей цвета C_{A-11}/C_{A-16} для данного фазового угла. Зависимость нормирована на угол $\alpha = 10^\circ$ и аппроксимирована кубическим полиномом. (б) — Фазовая зависимость показателя цвета “морского” образца (КК Apollo-12), разделенная на аналогичную зависимость для “материкового” образца (КК Apollo-14) (по данным рис. 5б). Каждая точка на графике представляет собой отношение показателей цвета C_{A-12}/C_{A-14} для данного фазового угла. Зависимость нормирована на угол $\alpha = 10^\circ$ и аппроксимирована кубическим полиномом.

1.6) и морского (КА Луна-16, образец 1603) грунта указывает на наличие минимума зависимости $C_{\text{море}}(\alpha)/C_{\text{материк}}(\alpha)$ примерно в том же диапазоне фазовых углов (Шкуратов и др., 1996).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фазовая зависимость яркости лунной поверхности формируется главным образом следующими механизмами: одночастичным рассеянием, теневым эффектом, некогерентным многократным

рассеянием между частицами и, наконец, макроскопической шероховатостью поверхности (Нарке, 1993; Shkuratov и др., 1999). При фазовых углах $\alpha \leq 40^\circ - 50^\circ$ на фотометрическую функцию из перечисленных механизмов определяющее влияние оказывает теневой эффект и некогерентное многократное рассеяние частиц, ослабляющее влияние теневого эффекта. Таким образом, в указанном диапазоне фазовых углов наблюдается зависимость крутизны фазовой функции яркости от альбедо поверхности, связанная с частичной засветкой теней из-за прозрачности частиц реголита (Shkuratov и др., 2005; Корохин и др., 2007). Исходя из этого, увеличение показателя цвета $C(\lambda_1/\lambda_2)$ ($\lambda_1 > \lambda_2$) с ростом фазового угла можно объяснить вкладом рассеяния высших порядков в общее рассеяние. С увеличением альбедо вклад многократного рассеяния увеличивается. Это значит, что для поверхности с большим колор-индексом $C(\lambda_1/\lambda_2)$ увеличивается различие фазовых зависимостей яркости $R(\lambda_1, \alpha)$ и $R(\lambda_2, \alpha)$; таким образом, фазовая зависимость цвета $C(\alpha) = R(\lambda_1, \alpha)/R(\lambda_2, \alpha)$ более выражена. В соответствии с этими соображениями более темный и более “синий” морской грунт должен иметь более нейтральный ход $C(\alpha)$ по сравнению с материковым веществом. Действительно, наши результаты исследования ФОПЦ для Луны и лабораторные измерения спектров подтверждают тенденцию меньшего наклона фазовой функции цвета для морского грунта.

При дальнейшем увеличении α ($>40^\circ - 50^\circ$) мезо- и макроскопическая шероховатость поверхности начинает заметно влиять на фазовую зависимость яркости; при больших α мезо- и макрорельеф играют определяющую роль (Шкуратов и др., 2003; Корохин и др., 2007). Для достаточно темной поверхности (т.е. поверхности Луны в видимом диапазоне спектра) крутизна фазовой функции почти не зависит от альбедо при больших α . Следовательно, изменение характера зависимости для больших фазовых углов $\alpha > 40^\circ - 60^\circ$ (здесь морской грунт имеет более крутую зависимость $C(\alpha)$ по сравнению с материковым) связано с уменьшением вклада многократного рассеяния при очень больших фазовых углах. Это рассмотрение полностью подтверждается компьютерным моделированием многократного рассеяния света в порошкообразных средах в приближении геометрической оптики (Станкевич, Шкуратов, 2002; Stankevich и др., 2003; Stankevich, Shkuratov, 2004).

В заключение отметим основные результаты работы.

С использованием новых колориметрических наблюдений видимого полушария Луны для двух участков поверхности построены изображения фазового отношения показателя цвета $C(600/470 \text{ нм})$ для углов фаз в интервале от 2° до 95° . В диапазоне фазовых углов $<40^\circ - 50^\circ$ это отношение антикоррелирует с изображением яркости. Затем происходит

инверсия контраста море/материк, и при угле фазы $>50^\circ$ видна прямая корреляция ФОПЦ с альбедо поверхности. Далее, чем больше угол фазы, тем сильнее прямая корреляция ФОПЦ с альбедо.

Данные лабораторной спектрофотометрии образцов лунного грунта при изменяющейся геометрии светорассеяния, проведенной с помощью спектрометров RELAB, подтверждают особенности фазовой зависимости цвета, найденные по телескопическим данным. Так, оценка различий в фазовой зависимости для лунных морских и материковых образцов совпадает с аналогичными значениями для морских и материковых участков Луны, полученными по данным телескопической съемки. Вывод об одинаковом ходе фазовой зависимости цвета для морских и материковых образцов при $\alpha = 40^\circ - 60^\circ$ согласуется с оценкой $40^\circ - 50^\circ$, сделанной при анализе телескопической спектрофотометрии видимого полушария Луны.

Вариации фазовой зависимости показателя цвета различных лунных регионов необходимо учитывать при калибровке данных спектрофотометрии лунной поверхности. Это представляется важным в свете того, что сейчас рядом научных коллективов ведется обработка спектрофотометрических данных лунных миссий Change-1 (Китай), SELENE (Япония), Chandrayaan-1 (Индия).

Эта работа выполнена при финансовой поддержке CRDF грант UKP2-2897-KK-07.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акимов Л.А., Антипова-Каратаева И.И., Езерский В.И., Шкуратов Ю.Г. Некоторые результаты изучения оптических свойств проб реголита “Луны-24” // Лунный грунт из Моря Кризисов / Ред. Барсуков В.Л. М.: Наука, 1980. С. 333–341.
- Евсюков Н.Н. О связи колориметрических и спектрометрических измерений лунной поверхности // Проблемы космической физики. 1975. Вып. 10. С. 89–95.
- Кайдаш В.Г., Герасименко С.Ю., Шкуратов Ю.Г. и др. Картирование вариаций фотометрической функции видимого полушария Луны // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. № 2. С. 99–109.
- Корохин В.В., Великодский Ю.И., Шкуратов Ю.Г., Маль У. Исследование фазовой зависимости яркости и цвета лунной поверхности по данным интегральной фотометрии // Астрон. вестн. 2007. Т. 41. № 1. С. 24–32.
- Опанасенко Н.В., Опанасенко А.Н., Шкуратов Ю.Г. и др. Картирование параметров отрицательной поляризации света, рассеянного лунной поверхностью // Астрон. вестн. 2009. Т. 43. № 3. С. 210–214.
- Станкевич Д.Г., Шкуратов Ю.Г. Многократное рассеяние света в реголитоподобных средах в приближении геометрической оптики // Астрон. вестн. 2002. Т. 36. № 5. С. 409–416.
- Шкуратов Ю.Г., Мелкумова Л.Я., Опанасенко Н.В., Станкевич Д.Г. О фазовой зависимости показателя

- цвета твердых поверхностей небесных тел // Астрон. вестн. 1996. Т. 30. № 1. С. 82–91.
- Шкуратов Ю.Г., Креславский М.А., Станкевич Д.Г. и др. Миссия SMART-1: фотометрические исследования Луны с помощью камеры AMIE // Астрон. вестн. 2003. Т. 37. № 4. С. 1–10.
- Adams J.B., Filice A.L. Spectral reflectance 0.4 to 2.0 microns of silicate rock powders // J. Geophys. Res. 1967. V. 72. № 22. P. 5705–5715.
- Akimov L.A., Antipova-Karataeva I.I., Shkuratov Yu.G. Indicatrix measurements of lunar samples from landing sites of Luna 24, Luna 16, and Luna 20 // Lunar and Planet. Sci. Conf. X. 1979. LPI Houston, P. 9–11.
- Buil C. Spectroscopy, CCD and Astronomy. 2007 // <http://astrosurf.com/buil/350d/350d.htm>.
- Coyne G.V. Differential colors on the Moon // Astron. J. 1965. V. 70. № 1. P. 115–119.
- Gradie J.C., Veverka J., Buratti B.J. The effects of scattering geometry on the spectrophotometric properties of powdered material // Lunar and Planet. Sci. Conf. XI. 1980 a. LPI Houston, Proc. V. 1. (A82-22251 09-91) P. 799–815.
- Gradie J.C., Veverka J., Buratti B.J. The effects of photometric geometry on spectral reflectance // Lunar and Planet. Sci. Conf. XI. LPI Houston, 1980b. P. 357–359.
- Hapke B. Theory of reflectance and emittance spectroscopy. Cambridge Univ. Press, 1993. 450 p.
- Jaumann R., Grobner C., Oehler A. Color-dependent variations of the photometric phase function: Implications on the interpretation of multispectral data // Bull. Amer. Astron. Soc. 1992. V. 24. № 3. P. 1021.
- Kaydash V., Kreslavsky M., Shkuratov Yu., et al. Photometric anomalies of the lunar surface studied with SMART-1 AMIE data // Icarus. 2009. V. 202. P. 393–413.
- Kreslavsky M.A., Shkuratov Y.G. Photometric anomalies of the lunar surface: Results from Clementine data // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. E3. P. 5015. doi: 10.1029/2002JE001937.
- Lane A.P., Irvine W.M. Monochromatic phase curves and albedos for the lunar disk // Astron. J. 1973. V. 78. № 3. P. 267–277.
- McCord T.B. Color differences on the lunar surface // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. № 12. P. 3131–3142.
- Mikhail J.S. Color variations with phase of selected regions of the lunar surface // The Moon 2. 1970. P. 167–201.
- O'Leary B., Briggs F. Optical properties of Apollo 11 Moon samples // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. № 32. P. 6532–6537.
- O'Leary B., Briggs F. Optical properties of Apollo 12 Moon samples // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. № 5. P. 792–797.
- New views on the Moon. Reviews in mineralogy and geochemistry / Eds Jolliff B.L., Wiczorek M.A., Shearer C.K., Neal C.R. Mineralogical Soc. of America, 2006. V. 60. 721 p.
- Peacock K. Multicolor photoelectric photometry of the lunar surface // Icarus. 1968. V. 9. № 1. P. 16–66.
- Pieters C.M. Composition of the lunar highland crust from near-infrared spectroscopy // Rev. Geophys. 1986. V. 24. № 3. P. 557–578.
- Pieters C.M., Pratt S., Hoffmann H., et al. Bidirectional spectroscopy of returned Lunar soils: Detailed “Ground truth” for planetary remote sensors // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXII. LPI Houston, 1991. P. 1069–1070.
- Pieters C., Hiroi T. RELAB (Reflectance Experiment Laboratory): A NASA multiuser spectroscopy facility // Lunar and Planet. Sci. XXXV. LPI Houston, 2004. Abstract #1720.
- Rougier G. Photometrie photoelectrique globale de la Lune // Ann. Obs. Strasbourg. 1933. V. 2. P. 203–339.
- Shkuratov Yu.G., Kreslavsky M.A., Ovcharenko A.A., et al. Opposition effect from Clementine data and mechanisms of backscatter // Icarus. 1999. V. 141. P. 132–155.
- Shkuratov Yu.G., Stankevich D.G., Petrov D.V., et al. Interpreting photometry of regolith-like surfaces with different topographies: Shadowing and multiple scattering // Icarus. 2005. V. 173. P. 3–15.
- Stankevich D., Shkuratov Yu., Grynkó E., Muinonen K. Computer simulations for multiple scattering of light rays in systems of opaque particles // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2003. V. 76. № 1. P. 1–16.
- Stankevich D., Shkuratov Yu. Monte Carlo ray-tracing simulation of light scattering in particulate media with optically contrast structure // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 87. № 3–4. P. 289–296.
- Yokota Y., Matsunaga T., Ohtake M., et al. Lunar phase curve at vis/nir wavelength observed by SELENE spectral profiler // Lunar and Planet. Sci. Conf. XXXX. LPI Houston, 2009. Abstract #2525.